

ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ

Носов Н. В.

Самарский государственный технический университет, г. Самара

Оптимальные характеристики и область применения абразивного инструмента (АИ) не могут быть найдены без разработки технологических основ процесса шлифования. Эффективность применения АИ при шлифовании зависит от многих факторов: марки обрабатываемого материала и его термообработки, размеров, формы и вида обрабатываемой поверхности, требуемой точности и качества поверхности, снимаемого припуска, технологических возможностей оборудования, режимов и условий обработки. В качестве критериев при оптимизации могут быть использованы производительность процесса Q или себестоимость обработки C . Если целевая функция не имеет экстремума, то вводится система технических ограничений. Для построения математической модели АИ необходимо оптимизировать следующие характеристики: марку зерна, зернистость (d_o), объемное соотношение компонентов (C_1 - зерна, C_2 - связки, C_3 - пор) характер упаковки (φ), степень контактного сближения зерен (α) и количество режущих зерен (n_p). В основу системного подхода к разработке математической модели АИ положено создание трех взаимосвязанных подсистем, включающих модель абразивного пространства, поверхностного слоя и условий правки. Проектирование оптимальных характеристик АИ производится путем решения двух систем уравнений: по определению оптимальной зернистости и нахождению объемных соотношений зерен и связки.

Для оптимизации зернистости и количества режущих зерен разработана следующая система технических ограничений:

1. Условие контакта рабочей поверхности круга с обрабатываемой поверхностью, т.е.

$$3 < \left(\frac{L_k}{L_{yc}} + 1 \right) \leq 2,$$

где L_k - длина дуги контакта инструмента с заготовкой; L_{yc} - расстояние между зернами в продольном направлении.

2. Условие контакта зерен с обрабатываемой поверхностью после правки, т.е.

$$3 < \left(\frac{L_k}{L_{yp}} + 1 \right) \leq 2,$$

где L_{yp} - расстояние между зернами после правки.

3. Условие достижения абразивным зерном критической глубины резания

$$a_{zp} \geq \frac{L_{yc} \cdot V_d}{n_p \cdot 60 \cdot V_k},$$

где V_d - скорость заготовки; V_k - скорость круга.

4. Предельное содержание зерен.

5. Условие образования шероховатости поверхности при резании единичным зерном

$$R_z \geq [\varepsilon_{kp}]_p \cdot \rho_3 + (\varepsilon_o - C_H V_k) \cdot \rho_3 \sqrt{\frac{8}{\pi} [\varepsilon_{kp}]_p \cdot \sqrt{2 [\varepsilon_{kp}]_p}},$$

где $[\varepsilon_{kp}]_p$ - относительная критическая глубина резания; ρ_3 - радиус закругления зерна; ε_o - коэффициент относительной пластической деформации; C_H - коэффициент, учитывающий динамику процесса шлифования.

6. Кинематическое условие образования шероховатости

$$R_z \geq \frac{V_d \cdot L_{yc}}{60 \cdot V_k \cdot n_p} \cdot \sqrt{A} \cdot \frac{S}{B} (1,24 - 0,0025 \cdot V_k),$$

где A - коэффициент, учитывающий метод шлифования; S - продольная подача круга; B - ширина круга.

7. Условие образования шероховатости режущим профилем

$$R_z \geq S_c^2 / 8 - \rho_3,$$

где S_c - подача на единичный режущий профиль.

После подстановки соответствующих параметров получим систему неравенств, представляющих модель рабочей поверхности при шлифовании в условиях ударного взаимодействия зерен с обрабатываемой поверхностью (работа в режиме самозатачивания) :

$$\begin{aligned}
1 \quad d_0 &\leq \frac{L_K}{2 \cdot K_{\text{крV}} \cdot \cos(\varphi_c/2)}; \\
2 \quad d_0 \cdot n_p^{-1} &\geq \frac{L_K}{2 \cdot K_{\text{крV}} \cdot \cos(\varphi_c/2)}; \\
3 \quad n_p \cdot d_0^{115} &\leq \frac{0015 \cdot K_{\text{крV}} \cdot \cos(\varphi_c/2) \cdot V_d}{V_{\text{кр}}^{\beta 3} \cdot [\text{tg}(\varepsilon_{\text{CP}}/2)]^{215}}; \\
4 \quad n_p &\leq 1; \\
5 \quad d_0^{17} &\leq \frac{R_Z \cdot V_K^{\beta 3}}{23 \cdot [\text{tg}(\varepsilon_{\text{CP}}/2)]^{17} \cdot (124 - 00025 \cdot V_K) \cdot 075^{\left(\frac{B}{5} - 1\right)}}; \\
6 \quad n_p^{-1} \cdot d_0 &\leq \frac{30 \cdot V_K \cdot B \cdot R_Z}{V_d \cdot K_{\text{крV}} \cdot \cos(\varphi_c/2) \cdot \sqrt{A_t} \cdot S \cdot (124 - 00018 \cdot V_K)}; \\
7 \quad d_0 \cdot n_p^{-2} &\geq \frac{R_Z \cdot \pi^2 \cdot D_K^2 \cdot \text{tg}(\varepsilon_{\text{CP}}/2)}{7.7 \cdot [K \cdot B \cdot K_{\text{крV}} \cdot \cos(\varphi_c/2)]^2}.
\end{aligned} \tag{1}$$

С точки зрения АИ максимизация функции процесса достигается при

$$d_0 \cdot n_p \rightarrow \max. \tag{2}$$

Решая совместно систему (1) и условие (2), находим оптимальные значения $d_{\text{опт}}$ и $n_{\text{роп}}$ по заданной производительности $Q_{\text{уд}}$ и R_Z .

В процессе правки расстояние между зернами в продольном и поперечном направлениях изменяются, поэтому в систему (1) вместо $L_{\text{ус}}$ подставим $L_{\text{ур}}$, тогда получим систему неравенств, представляющую математическую модель АИ с принципиально новыми условиями износа круга (работа в режиме затупления):

$$\begin{aligned}
1. \quad d_0 &\leq \frac{L_K \cdot (S_{IP} - 0.65 \cdot [S_P]^{0.52})}{2 \cdot S_{IP} \cdot K_{kpV} \cdot \cos \varphi_C / 2}; \\
2. \quad d_0 \cdot n_p^{-1} &\geq \frac{L_K \cdot (S_{IP} - 0.65 \cdot [S_P]^{0.52})}{2 \cdot S_{IP} \cdot K_{kpV} \cdot \cos \varphi_C / 2}; \\
3. \quad n_p d_0^{115} &\leq \frac{0.015 \cdot K_{kpV} \cdot S_{IP} \cdot \cos(\varphi_{CP} / 2) \cdot V_D}{V_{KP}^{0.3} \cdot (S_{IP} - 0.65 \cdot S_P^{0.52}) \cdot \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\varepsilon_{CP}}{4} + \frac{\arccos(S_{IP} / 2\rho_a)}{2} \right) \right]^{2.15}}; \\
4. \quad n_p &\leq 1 \\
5. \quad d_0^{17} &\leq \frac{R_Z \cdot V_K^{0.53}}{23 \cdot \left[\operatorname{tg} \left(\frac{\varepsilon_{CP}}{4} + \frac{\arccos(S_{IP} / 2\rho_a)}{2} \right) \right]^{1.7} \cdot (1.24 - 0.0018 \cdot V_K) \cdot 0.75^{\left(\frac{B}{5} - 1\right)}}; \\
6. \quad n_p^{-1} \cdot d_0 &\leq \frac{30 \cdot V_K \cdot B \cdot R_Z \cdot (S_{IP} - 0.65 \cdot S_P^{0.52})}{V_D \cdot K_{kpV} \cdot S_{IP} \cdot \cos(\varphi_C / 2) \cdot \sqrt{A_i} \cdot S \cdot (1.24 - 0.0018 \cdot V_K)}; \\
7. \quad d_0 \cdot n_p^{-2} &\geq \frac{R_Z \cdot \pi^2 \cdot D_K^2 \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon_{CP} / 2) \cdot (S_{IP} - 0.65 \cdot S_P^{0.52})^2}{7.7 \cdot [K \cdot B \cdot K_{kpV} \cdot S_{IP} \cdot \cos(\varphi_C / 2)]^2}; \\
8. \quad d_0 \cdot n_p &\rightarrow \max,
\end{aligned} \tag{3}$$

где $S_{\text{ип}}$ - продольная подача алмаза при правке; S_p - поперечная подача алмаза при правке; D_k - диаметр круга; $K_{kpV} = 1.7$; ε_{cp} - угол при вершине зерна.

Решение системы (3) позволяет оптимизировать зернистость АИ в принципиально новых условиях его износа, что дает возможность значительно упростить дальнейшие расчеты.

Оптимизация пористости и структуры является наиболее важным этапом при проектировании АИ. Рассмотрим ряд технических ограничений:

1. Условие обеспечения поровым пространством круга заданной скорости съема припуска, т.е. объем пор V_1 должен быть больше объема стружки, приходящейся на 1 оборот круга V_2 или

$$V_1 \geq V_2.$$

2. Необходимо, чтобы минимальный размер единичной поры $l_{N.MIN}$ был больше максимального размера единичной стружки $l_{СТР.MAX}$, т.е. $l_{N.MIN} \geq l_{СТР.MAX}$.

3. 4. 5. 6 - связаны с технологией изготовления АИ и предельными объемными соотношениями C_3 и C_1

7. Условие обрабатываемости материала, т.е. $H_{\mu a} \geq 2H V_M$,

где H_{μ} - микротвердость абразивного зерна; $H V_M$ - твердость по Виккерсу обрабатываемого материала.

8. Условие формирования требуемого количества мостиков связки с целью увеличения прочности и стойкости АИ, т.е. $Z_3 \geq N_1$.

9. Условие формирования отрицательной усадки и упрочнения АИ

$$\frac{d_{\text{от}}}{1 - \alpha_{\text{уп}}} \left(\sqrt[3]{\left(\frac{2C_2}{C_1} + 1 \right) \frac{6A_0}{\pi}} - \sqrt[3]{\left(\frac{C_2}{C_1} + 1 \right) \frac{6A_0}{\pi}} - 1 \right) - 2\alpha_1 h_{\text{ОМАХ}} \geq 0,$$

где $\alpha_{\text{уп}}$ коэффициент упрочнения АИ; A_0 коэффициент объема абразивного зерна.

10. Условие достаточности связки при взаимодействии, т.е.

$$K_{\text{срV}} \leq 1.7$$

Подставив соответствующие параметры и преобразовав их, получим модель оптимизации пористости и структуры АИ, состоящую из 10 неравенств (4).

В данной системе количество зерен Z_C на 1 мм^2 соответствует структуре круга, а Z_P соответствует количеству зерен на рабочей поверхности круга после правки. В данном случае максимальная производительность процесса достигается при $C_3 + C_1 \rightarrow \max$ (целевая функция). Решая совместно систему неравенств (4) и целевую функцию, находим $C_{3\text{опт}}$ и $C_{1\text{опт}}$

Таким образом, зная оптимальные характеристики АИ с точки зрения технологического обеспечения требуемой производительности процесса и качества поверхности, можно определить оптимальные режимы шлифования (заключительный этап проектирования).

$$\left. \begin{aligned}
1. \quad C_3 &\geq \frac{10}{K_{\text{лрв}} \cdot d_{\text{оот}} \cdot \sqrt[4]{\frac{D_K \pm d_D}{D_K \cdot d_D \cdot \rho_3}}} \cdot \sqrt{\frac{Q_{\text{уд}} \cdot n_{\text{рогт}}}{V_K \cdot \sin \phi_{\text{ср}}}}; \\
2. \quad C_3 + \frac{8.6 \cdot Q_{\text{уд}}}{d_{\text{оот}}^3 \cdot A_0 \cdot \psi_n^3 \cdot Z_{\text{ср}} \cdot n_{\text{рогт}} \cdot D_K} \cdot C_1 &\leq 1; \\
3. \quad C_3 &\geq 0.26; \\
4. \quad C_3 &\leq 0.48; \\
5. \quad C_1 &\geq 0.24; \\
6. \quad C_1 &\leq 0.62; \\
7. \quad C_3 + \frac{\pi}{6A_0} \left[1 + \frac{2 \cdot h_p}{d_{\text{оот}}} \left(\frac{H_{\mu 3} \frac{b_{s_2}}{b_{s_1}} - 2H V_M}{2H V_M - H_{\mu c} \frac{b'_{s_1}}{b_{s_1}}} \right)^{-3} \right] \cdot C_1 &\geq 1; \\
8. \quad C_3 &\leq 1 - \frac{(Z_3 - 2)^2}{8(Z_3^2 - 0.6Z_3 - 1.76) \left(0.5 - \frac{2\alpha_1 h_{\text{омах}}}{d_{\text{оот}}} \right)^3}; \\
9. \quad \frac{(5.3 \dots 5.6) d_{\text{оот}}}{1 - \alpha_{\text{уп}}} \cdot C_3 + C_1 &\geq 1; \\
10. \quad C_3 + \frac{0.93}{A_0} \cdot C_1 &\leq 1.
\end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В модель оптимизации режимов входят следующие технические ограничения: 1 - шероховатость R_a , 2 - мощность шпинделя N , 3 - точность обработки, 4 - стойкость инструмента, 5 - температура шлифования, 6 - скорость съема припуска, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 - кинематические возможности станка.

Для примера приведем математическую модель процесса круглого наружного шлифования с продольной подачей для АИ из корунда, полученного самораспространяющимся высокотемпературным синтезом.

1. $V_1^{y_a} \cdot t^{z_a} \cdot S_1^{u_a} \leq \frac{R_a \cdot V_K^{x_a} \cdot d_3^\mu}{C_a \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot B^{4a}};$
2. $V_1^r \cdot t^x \cdot S_1^y \leq \frac{N \cdot \eta}{C_N \cdot d_3^q \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot B_3^y};$
3. $V_1^r \cdot t^x \cdot S_1^y \leq \frac{\mu_v \cdot E \cdot l \cdot [f_{MAX}] \cdot V_K}{1020 \cdot C_N \cdot l_3^3 \cdot d_3^q \cdot B_K^y \cdot K_{ш} \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7};$
4. $V_1^{0,8} \cdot t^{x_m} \cdot S_1^{y_m} \leq \frac{C_T}{B_K^{y_m} \cdot T_K^{x_m}} \cdot \left(\frac{H_{\mu a}}{2 \cdot H V} \right)^{z_m};$
5. $V_1^{(r-0,5)} \cdot t^{(x-0,25)} \cdot S_1^{(y-1)} \leq \frac{\Theta_{KP} \cdot \lambda_M \cdot d_3^{(0,25-q)} \cdot B_K^{(1-y)}}{8765 \cdot a_M^{0,5} \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7};$
6. $V_1^{z_s} \cdot t^{x_s} \cdot S_1^{y_s} \leq \frac{C_s \cdot d_3^{a_s} \cdot (2Z_{MAX})^{q_s}}{B_K^{y_s}};$
7. $S_1 \geq \frac{1000 \cdot S_{M \min}}{B_K \cdot n_{3 \max}};$
8. $S_1 \leq \frac{1000 \cdot S_{M \max}}{B_K \cdot n_{3 \min}};$
9. $t \geq t_{cm \min};$
10. $t \leq t_{cm \max};$
11. $V_1 \geq \frac{n_{3 \min} \cdot \pi \cdot d_3}{1000};$
12. $V_1 \geq \frac{n_{3 \max} \cdot \pi \cdot d_3}{1000};$
13. $V_1 \leq V_K / 40;$
14. $V_1 \geq V_K / 100;$
15. $V \cdot t \cdot S_1 \rightarrow \max(\text{целевая функция}).$

(6)

Для решения системы (6) разработана программа на ЭВМ, которая определяет $V_{\text{от}}$, $t_{\text{от}}$ и $S_{\text{от}}$, произведение которых даст реальную производительность процесса Q_P . Найденную Q_P сравнивают с заданной величиной $Q = Q_{\text{уя}} \cdot S_1$ и, если $Q_P \leq Q$, то проектирование операции шлифования заканчивается. В случае $Q_P > Q$ необходимо изменить d_0 и n_P , т.е. вернуться к решению системы (1 или 3).

Таким образом, на основании приведенных обобщений теоретических и экспериментальных результатов разработана методика проектирования АИ и оптимизация режимов шлифования.